

УДК 669.02/.09:62-83

Артюх В. С.

ЭНЕРГИЯ ПРИВОДА - ИСТОЧНИК ДИНАМИЧНОСТИ И АВАРИЙНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Постепенный процесс упразднения маховичного привода металлургического оборудования сопровождается быстрым ростом энергии мощного и быстроходного безмаховичного привода; при этом рост энергии привода значительно опережает рост его мощности.

Энергия привода была и остается основным источником динамичности и аварийности металлургического оборудования, работающего в тяжелых повторно-кратковременных режимах и отличающегося значительными колебаниями как технологических, так и динамических нагрузок [1]. Следовательно, нужно, ускоряя процесс упразднения маховичного привода на старом оборудовании, найти пути снижения энергии безмаховичного привода на действующем и строящемся оборудовании, несмотря на значительный рост его мощности. Для этого существуют реальные и экономичные пути.

Ниже рассмотрены вопросы создания приводов с минимальной энергией для широкого класса металлургических машин.

Кинетическая энергия вращающихся масс привода определяется по формуле

$$E = \frac{GD_{\text{прив}}^2 \cdot n^2}{7340} \text{ кВт. сек.}, \quad (1)$$

где $GD_{\text{прив}}^2$ - маховый момент привода, приведенный к валу двигателя, (кНм²),
 n - число оборотов двигателя (об/мин.).

Накопление энергии в приводе происходит за счет работы двигателя в течение периода пуска (разгона), определяемого из выражения:

$$t_{\text{пуска}} = \frac{GD_{\text{прив}}^2 \cdot n}{375 \cdot (M_{\text{пуска}} - M_{\text{сопр.}})} \quad (2)$$

где $M_{\text{пуска}} = \lambda \cdot M_{\text{ном.}}$, (кНм);

$$\lambda = \frac{J_{\text{max}}}{J_{\text{ном.}}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном.}}} = 2 \div 2,5 \quad \text{- для двигателей постоянного тока;}$$

$$\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном.}}} = 1,5 \div 2,0 \quad \text{- для двигателей переменного тока;}$$

$M_{\text{сопр.}}$ - момент сопротивления машины, приведенный к валу двигателя (кНм).

При разгоне привода время разгона, угловое ускорение и динамический момент имеют ограниченные значения. Максимум динамического момента равен пусковому моменту двигателя $\lambda \cdot M_{\text{ном.}}$ при $M_{\text{сопр.}} = 0$, а минимум - нулю при $M_{\text{пуск.}} = M_{\text{сопр.}}$. Другая картина наблюдается при расходе энергии в момент нарастания технологических нагрузок, и особенно при перегрузках.

Если статический момент двигателя всегда отстает во времени от технологического момента (и это отставание тем больше, чем выше уровень энергии привода [2]), то динамический момент нарастает с быстротой технологического момента и не поддается никакому контролю. Его разрушительная способность может быть ограничена либо снижением энергии привода, либо ценой разрушения специальной предохранительной детали.

Энергия привода находится в степенной зависимости от оборотов двигателя и линейной - от его махового момента. Поэтому не маховый момент, а число оборотов двигателя оказывает решающее влияние на уровень энергии привода, несмотря на значительный рост маховых моментов тихоходных двигателей.

Энергия привода постоянна для любого вала, привода и машины, а маховый момент возрастает от быстроходного вала двигателя к тихоходному валу машины согласно выражению

$$GD_{\max}^2 = GD_{\text{прив.}}^2 \cdot i_{\text{ред.}}^2 \quad (3)$$

где $i_{\text{ред.}}$ - передаточное число привода.

Если энергию близких по мощности двигателей можно сравнивать между собой по абсолютным значениям, то маховые моменты - только по приведенным значениям, и при том к валам равной или близкой быстроходности.

Рассмотрим это на конкретном примере. В таблице 1 приведены силовые параметры типичных маховичных и безмаховичных приводов металлургических машин.

Так, приведенный к оси конвертера маховый момент двигателей 2×95 кВт, благодаря большому передаточному числу $i_{\text{ред.}} = 1072,3$ достигает колоссальных значений $GD_{\text{прив.}}^2 = 156 \cdot 10^4 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$, а энергия привода составляет всего 46 кВт.сек. Отсюда видно, что для оценки динамичности приводов необходимо сравнить их энергию, а не маховые моменты.

Для сравнения динамичности приводов, различных по мощности, быстроходности и конструктивному устройству, следует пользоваться коэффициентом удельной энергии $K = E/N$ (сек), представляющем собой энергию привода, приходящуюся на единицу мощности. Этот коэффициент является наиболее универсальным критерием динамичности. Он показывает продолжительность накопления энергии в приводе или ее расхода в машине при нагрузке, соответствующей номинальной мощности.

Установим зависимость между удельной энергией и временем разгона. Подставляя в выражение (2) $M_{\text{пуска}} = \lambda \cdot M_{\text{ном.}} = 2 \cdot M_{\text{ном.}}$; $M_{\text{сопр.}} = M_{\text{ном.}}$; $M_{\text{ном.}} = 0,975 \cdot N/n$, получим

$$t_{\text{раз.}} = \frac{GD_{\text{прив.}}^2 \cdot n^2}{365 \cdot N} \quad (4)$$

Формула (4) выгодно отличается от общепринятой формулы (2), так как в ней переменные параметры $GD_{\text{прив.}}^2$ и $M_{\text{дин.}}$ заменены постоянными $GD_{\text{прив.}}^2$, n^2 и N .

Между удельной энергией и временем разгона существует простая зависимость, вытекающая из (1) и (4)

$$K \approx 0,5 \cdot t_{\text{раз.}} \text{ или } t_{\text{раз.}} = 2K = 2E/N \quad (5)$$

Рассмотрим связь между удельной энергией и постоянной инерции привода T , определяемой по формуле

$$T = \frac{2E}{N} \cdot S_{\text{ном.}} \quad (6)$$

где $S_{\text{ном.}} = \frac{n_0 - n}{n_0}$ - скольжение оборотов двигателя при номинальной нагрузке.

Учитывая $K = E/N$ и (6), получим $T = K \cdot 2S_{\text{ном.}}$, или при среднем значении $S_{\text{ном.}} = 0,06$

$$T = 0,12K \text{ либо } K \approx 8T \quad (7)$$

Установим зависимость между угловым ускорением двигателя при разгоне и удельной энергией.

Подставляя в выражение $E = \frac{\pi \cdot n}{30 \cdot t_{\text{раз.}}}$ значение $t_{\text{раз.}}$ из (5), получим

$$E = 0,0525 \cdot \frac{n}{k} \quad (8)$$

Таблица 1.

Сравнение силовых и энергетических параметров металлургических машин

Наименование привода	ПАРАМЕТРЫ ПРИВОДА						Приведенный маховой момент привода, тм ²	Энергия привода кВт.сек.	Коэффициент удельной энергии $K = E/N$, сек.	Примечание
	Мощность N, (кВт)	Число оборотов n, (об/мин)	Маховой момент $GD^2_{як.}$, (тм ²)	Маховой момент маховика $GD^2_{мав.}$, (тм ²)	Передаточное число редуктора i ред.					
Агрегат ГД-М стана 4500	2×1840	485	1×14,5	575	-		604	194000	53	
Агрегат ГД-М блонища 1150	3670	375	29	770	-		799	153000	41	
Стан трио Лау- та 860/600/860 з-да им. Ильича	3000	370	25	160	5		3625	35000	12	
Стан трио Лау- та 860/650/860 и 760/600/760 ТТМЗ	1450	73	57,5	4800	б/р		4860	34800	24	
Автоматетан 400 РМЗ	1840	375-500	14	140	б		5200	29700	15,6	при n=375 об/мин
Пилгримовые станы 5×10" ТТМЗ	2500	60±120	300	2050	б/р		2350	16700	6,7	при n=72 об/мин
Пилгримовые станы 8×16" ЧТПЗ	2570	35±70	500	4500	б/р		5000	10900	4,25	при n=40 об/мин
Конвертер	2×95	500	2×0,068	-	1072		156000	46	0,24	
Стан 2500 ММК (черновая клеть)	4600	428	35,5	-	24		20600	8900	1,9	
Стан 1700 (чистовая клеть №5)	5000	175/330	110	-	4,5		2240	16500	3,3	при n=330 об/мин
Ножницы 2000т. слябинга 1100 Запорожсталь	4×180	550±1100	0,35	-	150		7875	2300	3,2	при n=1100 об/мин
Ножницы 1000т. блонища 1150	2×360	500±800	0,95	-	48,8		2220	1660	2,3	при n=800 об/мин
Ножницы 2800т. слябинга 1250 Бокоро, Индия	2×2000	25±30	110	-	2,46		665	270	0,0675	

Продолжение таблицы 1.

Первый советский блюминг 1150	5150	0-50-120	385	-	б/р	385	1310	0,25	при n=150 об/мин
Третий советский блюминг 1300	2x6800	0-60-90	320	-	б/р	320	2x1580=3160	0,23	при n=60 об/мин
Первый советский слябинг 1100	2x3670	0-50-100	160	-	б/р	160	2x545=1090	0,148	при n=50 об/мин
Третий советский слябинг 1250	2x6800	0-40-80	300	-	б/р	300	2x655=1310	0,096	при n=40 об/мин
Ножницы 1000т. блюминга 1200 КМК	2x515	20	45	-	б/р	2x45	49	0,048	

Таблица 2.

Силовой анализ приводов скиповых лебедок УЗТМ

Тип лебедки	Грузоподъемность		Скорость подъема, м/мин	Характеристика двигателей				Общее передаточное число $i_{\text{вс}}$	Энергия привода $E = \frac{2GD_{\text{вк}}^2 \cdot n^2}{7340}$, кВт.сек.	Приведенный маховый момент $2GD_{\text{вк}}^2 \cdot i_{\text{ред}}^2$, кНм ²	Коэффициент удельной энергии $K = \frac{E}{N}$, сек.
	ном. кН.	макс. кН.		Тип	Мощность N, кВт.	Число оборотов n, об/мин.	Маховый момент $GD_{\text{вк}}^2$, кНм ²				
C-15-180	15	19	180	ДП 55/34-4К	2x190	620x920	1,45	25,84	152x335	1940	0,40+0,98
C-22,5-210	22,5	25	210	ДП 74/34-6К	2x260	500x700	4,60	18,59	314x616	3160	0,60+1,18
C-29-210	29	42,25	210	ДП 74/37-6К	2x480	685x875	5,00	23	640x1040	5290	0,67+1,185
ЛС-39-1	39	-	240	ДП 74/37-6К	2x550	750x960	5,00	26	765x1260	6760	0,70+1,145
Вариант безредукторного привода для лебедки с 22,5 - 210											
C-22,5-210	22,5	25	210	ПБК - 180	520	35	251,00	6/р	42,5	251	0,082

Принято считать, что статический момент двигателя достигнет величины момента сопротивления через 4 Т секунд; отсюда, с учетом (7) получим

$$4T = 0,48K \approx 0,5K \quad (9)$$

Установленные выше зависимости (5), (7), (8), (9) подтверждают универсальность коэффициента удельной энергии. По физическому смыслу, полноте характеристики привода и универсальности коэффициент удельной энергии выгодно отличается от всех других коэффициентов.

Он позволяет безошибочно судить о совершенстве и рациональности привода с точки зрения быстроты разгона и реверса, степени участия энергии привода в преодолении технологических нагрузок и, в конечном счете, динамичности и эксплуатационной надежности машины.

Этого нельзя сказать о таких параметрах, как мера кинетической энергии $GD_{\text{прив.}}^2 \cdot n^2$ и коэффициент маневренности M/GD^2 , принятых в "Электротяжмаше".

Мера кинетической энергии превышает собственно кинетическую энергию в 734 раза, а коэффициент маневренности в 4g раз меньше углового ускорения привода в момент разгона. Оба этих коэффициента имеют ограниченное значение при сравнении однотипных и близких по мощности и быстроходности приводов.

Несмотря на то, что энергия в агрегатах ГД-М непосредственно не приложена к главным линиям станов, эти агрегаты вытеснены безмаховичными Г-Д и безинерционными УРВ-Д и ТП-Д преобразовательными агрегатами.

На всех толстолистовых станах "трио Лаута" установлен маховичный, главным образом, редукторный привод с коэффициентами динамичности $K=12 \div 24$ (см. таблицу 1). Вместе с пилигримовыми станами они стоят в первом ряду по динамичности и аварийности среди всех прокатных станов.

Перевод этой большой группы станов на безмаховичный безредукторный привод от мощных тихоходных двигателей постоянного тока с регулируемым числом оборотов по схеме ТП-Д является основой их реконструкции. Это позволит повысить их эксплуатационную надежность до уровня современных реверсивных толстолистовых станов кварто.

На автоматических станах трубопрокатных агрегатов установлен маховичный редукторный привод с высокими коэффициентами динамичности ($K=15,6$). Опыт упразднения маховика на автоматстане 400 ЮТЗ показал, что при сохранении редуктора энергия быстроходного двигателя остается все еще значительной. Поэтому упразднение маховиков должно сопровождаться непременно упразднением редукторов. Только при этих условиях энергия привода может быть снижена до минимума.

Встречное движение гильзы и валков, заложенное в основу пилигримового процесса, поставило пилигримовые станы на первое место по динамичности и аварийности. И тем не менее, это единственные станы, на которых не только нельзя упразднить маховики, а напротив, желательно повысить их энергию, чтобы оградить станковые двигатели от динамических разрушений, повысить стабильность числа оборотов, обеспечить синхронную работу с подающими аппаратами, при которой только и возможно уменьшение ударов гильзы в валки [3].

К группе машин с маховичным приводом непосредственно примыкает самая многочисленная группа машин с редукторным безмаховичным приводом. В приводах этих машин нет физических маховиков, однако энергия мощных и быстроходных двигателей достигает таких же значений, как и в маховичных приводах.

Энергия редукторных приводов непрерывных широкополосных станов 1700 и 2500 достигает 16500 кВт.сек. для чистовых и 9000 кВт.сек. для черновых клетей ($K = 3,3$; $K = 1,9$ соответственно), см. таблицу 1.

Если в безредукторном приводе энергия собственно машины составляет $10 \div 20\%$ от энергии двигателя, то в редукторном приводе она снижается в

десятки раз, а при больших передаточных числах ее доля снижается до десятых долей процента. Таким образом, в машинах с редукторным приводом практически вся энергия сосредоточена в самом двигателе. Так, приведенный маховый момент двигателей привода конвертера 130 т. (см. таблицу 1) составляет $156 \cdot 10^4 \text{ кНм}^2$, а маховый момент собственно конвертера 3000 кНм^2 , то есть 1/500 часть. Приведенный маховый момент двигателя широкополосного стана 2500 составляет $20,6 \cdot 10^4 \text{ кНм}^2$, а маховый момент шпинделей, рабочих опорных валков - всего 700 кНм^2 то есть 1/300 часть.

Несмотря на то, что непрерывные и полунепрерывные широкополосные станы горячей прокатки работают в постоянном режиме, перевод их на безредукторный привод позволил бы резко снизить их энергию и аварийность.

Наглядным примером снижения передаточных чисел редукторного привода может служить развитие ножниц отечественных слябингов (см. таблицу 1).

Снижение числа оборотов двигателей от 550÷1100 об/мин., $i_{ред.} = 150$ на первом советском слябинге 1100 до $n=25÷30$ об/мин., $i_{ред.} = 2,46$ на третьем советском слябинге 1250, несмотря на увеличение мощности привода в 5,5 раз, позволило уменьшить энергию привода в 8,5 раз, а удельную энергию в 48 раз. Еще более эффективным оказался перевод ножниц 1000 т блюминга 1200 КМК на безредукторный привод (см. таблицу 1), при котором энергия привода уменьшилась в 34 раза.

Ниже, в таблице 2, приведен анализ развития скиповых лебедок УЗТМ, показывающий, что типичный процесс быстрого роста мощности и быстроходности сопровождается значительным ростом энергии привода. При росте мощности привода лебедки ЛС-39-1 по сравнению с лебедкой С-15-180 в 2,9 раза энергия привода возросла в 5 раз. В таблице приведен пример перевода лебедки С-22,5-210 на безредукторный привод от серийного двигателя ПБК-180. При этом энергия двигателя, несмотря на увеличение махового момента в 50 раз, уменьшилась в 14,5 раз.

Разница в энергии быстроходного редукторного и тихоходного приводов столь разительна, что преимущества последнего с точки зрения быстроты разгона, торможения, реверса, производительности машины, снижения динамичности и, в конечном счете - аварийности, совершенно очевидны.

Безредукторный привод не является, однако, пределом снижения энергии. Применение ускоряющих редукторов с $i_{ред.} < 1$ позволяет добиться дальнейшего ее снижения. Примером применения таких редукторов может служить 4-х клетевой стан 1700 холодной прокатки УЗТМ, у которого для всех четырех клеток применены редукторы $i_1=0,627$; $i_2=0,627$; $i_3=0,622$; $i_4=0,622$.

Несмотря на очевидность эксплуатационных преимуществ безредукторного привода, на широкополосных станах горячей прокатки, ножницах блюмингов и слябингов, лебедках маневрирования конусами и скиповых лебедках доменных печей, прошивных станах, кантователях и другом оборудовании применяется редукторный привод с высокими коэффициентами динамичности.

На динамичность машин с безредукторным безмаховичным приводом решающее влияние оказывает величина основной и заправочной скорости.

Основная скорость мощных обжимных реверсивных станов определяет величину номинальных и выключающих моментов главных двигателей, величину обжатий и числа пропусков, время разгона и реверса, динамичность главных линий, эффективность токовой защиты, эксплуатационную надежность и производительность станов [4].

Энергия привода клетки №4 стана 1700 холодной прокатки превышает 40000 кВт.сек. Однако при захвате полосы на заправочной скорости **0,5÷1 м/сек.** эта энергия уменьшается в **2500÷625 раз**, следствием чего является высокая эксплуатационная надежность данного стана. Для всех типов станов снижение скорости при захвате до 15÷20 об/мин. не только предупреждает возникновение

Таблица 3.
Силловые параметры блочинга 1170 комбината "Азовсталь" и слябинга 1100 комбината "Запорожсталь".

Тип стана	N, кВт.	n, об./мин.	GD ² _{ак.} , кНм ²	$\lambda = \frac{I_{\max}}{I_{\text{ном.}}}$	M _{ном.} кНм.	M _{вык.} = λ·M _{ном.}	$E = \frac{GD_{\text{ак.}}^2 \cdot n^2}{7340}$, кВт·сек.	$K = \frac{E}{N}$, сек.	t _{раз.} , сек.
БЛОЧИНГ 1170									
до модернизации	5150	0-40-100	5450	2,65	1260	3320	1190	0,23	0,46
после модернизации	7350	0-60-90	4550	2,65	1180	3130	2230	0,30	0,60
СЛЯБИНГ 1100									
до модернизации	2×3670	0-50-100	1600	2,0	2×720	2880	2×545=1090	0,148	0,296
после модернизации	2×9000	0-66-90	3400	2,75	2×1330	7300	2×2025=4050	0,22	0,44

пробуксовок, но и уменьшает энергию привода в моменты приложения нагрузок.

Наглядным примером неудачного выбора основной скорости может служить модернизация привода блюминга 1170 комбината "Азовсталь". Ниже, в таблице 3, приведены основные параметры этого стана до и после модернизации. Все параметры модернизированного привода, несмотря на увеличение мощности, ухудшились.

Не менее наглядным примером решающего влияния основной скорости на динамичность привода может служить модернизация привода слябинга 1100 комбината "Запорожсталь" (см. таблицу 3). Вследствие повышения основной скорости с 50 до 66 об/мин., несмотря на увеличение мощности привода в 2,54 раза и моментов прокатки в 1,85 раз, удельная энергия, время разгона и реверса возросли в 1,5 раза.

Таким образом, модернизированный привод по динамическим параметрам уступает первому приводу слябинга сорокалетней давности.

Следующим фактором уменьшения энергии является уменьшение маховых моментов двигателей. Примером может служить развитие приводов отечественных блюмингов и слябингов, приведенное в таблице 1. При росте мощности двигателей в $1,8 \div 2,6$ раза, за счет отдельного привода и двухъякорного исполнения двигателей, удалось уменьшить маховые моменты, время разгона и реверса и существенно затормозить возможное резкое увеличение энергии.

Примером значительного уменьшения махового момента служит привод моталки стана 1700 ХП, представляющий собой трехъякорный двигатель $N=3 \times 1000$ кВт., позволяющий сократить до минимума время разгона от заправочной до рабочей скорости.

Выводы

1. Снижение энергии привода является основным средством уменьшения динамичности и аварийности металлургического оборудования.
2. Снижение быстроходности и передаточных чисел, вплоть до применения безредукторного привода, позволяет резко уменьшить энергию, динамичность и аварийность оборудования с повторно-кратковременным режимом работы.
3. Уменьшение основной и, особенно, заправочной скорости для реверсивных станов до оптимальных значений оказывает решающее влияние на уменьшение их динамичности.
4. Коэффициент удельной энергии является наиболее универсальным критерием динамичности приводов, различающихся по мощности, быстроходности и конструктивному исполнению.

Перечень ссылок

1. Артюх В.С. Защита станов от перегруза // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1962. - №3. - С.29-36.
2. Артюх В.С. Снижение динамичности и аварийности прокатного оборудования // Сталь. - 1974. - №1. - С.85-87.
3. Артюх В.С. К вопросу реконструкции пилигримовых станов // Сталь. - 1965. - №8. - С.734-737.
4. Артюх В.С. К вопросу защиты блюмингов и слябингов // Сталь. - 1968. - №9. - С.812-815.